



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE CIÊNCIAS MÉDICAS

**THALITA REGINA VIEIRA E OLIVEIRA**

**Análise tridimensional pelo método dos elementos finitos de diferentes técnicas de fixação de fraturas associadas de côndilo e sínfise mandibulares.**

***Three-dimensional analysis by the finite element method of different techniques for fixation of associated condyle and mandibular symphysis fractures.***

CAMPINAS  
2017

THALITA REGINA VIEIRA E OLIVEIRA

**Análise tridimensional pelo método dos elementos finitos de diferentes técnicas de fixação de fraturas associadas de côndilo e sínfise mandibulares.**

***Three-dimensional analysis by the finite element method of different techniques for fixation of associated condyle and mandibular symphysis fractures.***

*Tese apresentada à Faculdade de Ciências Médicas da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutora em Ciências.*

ORIENTADOR: LUIS AUGUSTO PASSERI

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA PELA ALUNA THALITA REGINA VIEIRA E OLIVEIRA, E ORIENTADA PELO PROF. DR. LUIS AUGUSTO PASSERI

CAMPINAS  
2017

**Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s):** Não se aplica.

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Faculdade de Ciências Médicas  
Ana Paula de Moraes e Oliveira - CRB 8/8985

V673a Vieira e Oliveira, Thalita Regina, 1981-  
Análise tridimensional pelo método dos elementos finitos de diferentes técnicas de fixação de fraturas associadas de côndilo e sínfise mandibulares / Thalita Regina Vieira e Oliveira. – Campinas, SP : [s.n.], 2017.

Orientador: Luis Augusto Passeri.  
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Ciências Médicas.

1. Mandíbula. 2. Fraturas ósseas. 3. Técnicas de fixação da arcada osseodentária. I. Passeri, Luis Augusto, 1957-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Ciências Médicas. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Three-dimensional analysis by the finite element method of different techniques for fixation of associated condyle and mandibular symphysis fractures

**Palavras-chave em inglês:**

Mandible  
Fractures bone  
Jaw fixation techniques

**Área de concentração:** Fisiopatologia Cirúrgica

**Titulação:** Doutora em Ciências

**Banca examinadora:**

Luis Augusto Passeri [Orientador]  
Fernanda Vieira Ribeiro  
Alexander Tadeu Sverzut  
André Luiz Ferreira Costa  
Jorge Vicente Lopes da Silva

**Data de defesa:** 07-12-2017

**Programa de Pós-Graduação:** Ciências da Cirurgia

---

# **BANCA EXAMINADORA DA DEFESA DE DOUTORADO**

**THALITA REGINA VIEIRA E OLIVEIRA**

---

---

**ORIENTADOR: LUIS AUGUSTO PASSERI**

---

---

## **MEMBROS:**

**1. PROF. DR. LUIS AUGUSTO PASSERI**

**2. PROFA. DRA. FERNANDA VIEIRA RIBEIRO**

**3. PROF. DR. ALEXANDER TADEU SVERZUT**

**4. PROF. DR. JORGE VICENTE LOPES DA SILVA**

**5. PROF. DR. ANDRÉ LUIZ FERREIRA COSTA**

---

Programa de Pós-Graduação em Ciências da Cirurgia da Faculdade de Ciências Médicas da Universidade Estadual de Campinas.

A ata de defesa com as respectivas assinaturas dos membros da banca examinadora encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

---

**Data: 07/12/2017**

---

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus pais, Reinaldo e Sonia, que permitiram a minha vida, meu crescimento pessoal e profissional, e a oportunidade de conseguir realizar este trabalho.

A minha irmã, Bruna, meu anjo do Céu.

Ao meu marido e amado Renato, meu maior incentivador para realização dos meus sonhos.

Às minhas filhas, Lívia e Anna, alegrias da minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, pelo dom da vida, pelas oportunidades e por colocar pessoas especiais ao meu lado.

À Universidade Estadual de Campinas, na pessoa do Magnífico Reitor Prof. Dr. Marcelo Knobel.

À Faculdade de Ciências Médicas da Universidade Estadual de Campinas, nas pessoas do Diretor Prof. Dr. Ivan Felizardo Contrera Toro.

À Profa. Dra. Rosana Teresa Onocko Campos, Coordenadora Da Comissão de Pós-Graduação.

Ao Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer, onde foram realizadas as análises deste trabalho. Em especial, agradeço Dr. Jorge Vicente Lopes da Silva, Dr. Pedro Noritomi, Daniel Takanori Kemmoku, Paula Kaneko, Eric Nagata e todos os estagiários envolvidos neste trabalho.

À Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen, AO Foundation, pelo incentivo financeiro para este estudo.

Ao Prof. Dr. Luis Augusto Passeri, meu orientador. Agradeço todas as oportunidades que me deu, desde a graduação. Por acreditar que eu poderia estar ao seu lado para aprender e viver nossa especialidade. O admiro por sua competência e objetividade.

Aos meus amigos, da Escola Técnica Estadual Conselheiro Antônio Prado, da Faculdade de Odontologia de Piracicaba, da Santa Casa de Misericórdia de São Paulo, do Hospital do Servidor Público Estadual de São Paulo e do Centro Itatibense de Serviços Odontológicos. Obrigada pelo companheirismo e por deixarem um pouco de vocês na construção da pessoa que sou hoje. Minha caminhada teria sido menos alegre e mais difícil sem vocês.

Aos meus amados pais por serem meus exemplos de honestidade e otimismo. Por estarem sempre presentes ao meu lado apoiando e ajudando de todas as formas. Pelo amor incondicional. Obrigada por existirem.

À minha irmã, Bruna, por tudo que vivemos juntas na Terra e por todas as graças que me envia todos os dias do Céu.

Ao meu amigo, companheiro e amado Renato. Por estar ao meu lado, incentivando e ajudando em todos os momentos. Por ser minha inspiração para seguir a vida acadêmica. Por mostrar que tudo pode ser resolvido com determinação e bom humor. Pelo amor e felicidade.

Às minhas filhas, Livia e Anna, que com seu sorriso e seu abraço me mostram que tudo vale a pena, e que o amor é o que mais importa na vida.

**“Conheça todas as teorias, domine todas as técnicas, mas ao tocar uma alma humana, seja apenas outra alma humana”**

**Carl Jung**



## RESUMO

A fixação de fraturas mandibulares combinadas, especialmente as de côndilo e sínfise mandibular, embora frequentes e associadas a dificuldades no manejo clínico, raramente são investigadas. Desta forma, o objetivo deste estudo foi avaliar, através da análise de elementos finitos, o protocolo mais adequado para a fixação destas fraturas associadas, determinando quais métodos de tratamento promovem melhor distribuição de forças, e conseqüentemente, proporcionam maior estabilidade para consolidação óssea correta. Foi realizada a análise de elementos finitos avaliando a fixação do côndilo com uma miniplaca, duas miniplacas e uma placa trapezoidal, associadas à fratura da sínfise mandibular, fixada por duas placas dispostas paralelamente, duas placas dispostas perpendicularmente ou dois parafusos pela Técnica Lag Screw. A aplicação de força de 135N simulou forças funcionais, e a distribuição de forças foi analisada pelo software ANSYS. Os resultados mostraram que o estresse maior ocorre na região anterior do côndilo, próximo à incisura sigmoide. Além disso, a fixação adequada da fratura da sínfise resultou em menor tensão da região condilar. Desta forma quando a sínfise foi fixada pela Técnica Lag Screw, a fixação condilar não foi muito exigida, e pode ser fixada com uma ou duas miniplacas. Entretanto, quando a fixação da sínfise foi menos eficaz, utilizando as placas perpendiculares, houve mudança na distribuição de forças na região condilar, alterando o comportamento da fixação, resultando em maior tensão e deslocamento condilar, especialmente quando foi utilizada a placa trapezoidal. De acordo com os resultados obtidos, é possível concluir que a sínfise é adequadamente fixada com a Técnica Lag Screw e com as duas placas dispostas paralelamente, enquanto que duas placas ou a placa trapezoidal são adequadas para a fixação da região condilar. Contudo, a combinação da fixação da fratura de sínfise com as placas dispostas perpendicularmente, associada à fixação condilar com a placa trapezoidal alterou negativamente a distribuição de forças.

Palavras-chave: Mandíbula; Fraturas ósseas; Técnicas de Fixação da Arcada Osseodentária

## **ABSTRACT**

The fixation of combined mandibular fractures, especially symphysis-condyle fracture, although a common occurrence and higher complication rate in clinic, is rarely investigated regarding predictable therapeutic approaches. Thus, the present study's aim was to assess different forms of condyle fixation when combined with symphysis fracture fixation. Stress distribution that occurs when a condyle fracture is fixed using one miniplate, two miniplates, or a trapezoidal condyle miniplate and when symphyseal fracture is fixed using two parallel plates, two perpendicular plates or two lag-screws were analyzed by FEM. The null hypothesis was no differences in among different fixation techniques. The results showed stress concentration in the anterior region of condyle, close to the sigmoid notch. Moreover, adequate fixation in the symphysis could result in less tension in condyle region. Therefore, when the symphysis was fixed with Lag screw technique, the condyle fixation was less required, showing more adequate stress distribution when the condyle was fixed with one or two plates. Inversely, when the symphysis fixation was less effective, using perpendicular plates, there was a change in stress distribution on condyle region, altering fixation behavior, resulting in more tension and displacement in condyle, especially when trapezoidal plate was used. In conclusion, the lag-screw and parallel double plates appear to be suitable for symphyseal fixation, while two straightly positioned plates and a trapezoidal plate are suitable for condyle fixation. However, the combination of perpendicular plates in symphysis fixation and a trapezoidal plate in condyle fixation demonstrated altered stress distribution.

**Key words:** Mandible; Fractures, Bone; Jaw Fixation Techniques

## SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| Introdução.....  | 12 |
| Objetivos.....   | 15 |
| Metodologia.....   | 16 |
| Resultados.....  | 19 |
| Artigo: Finite element evaluation of stable fixation in combined mandibular fractures. J Oral Maxillofac Surg.2017 Nov;75(11):2399-2410. |    |
| Discussão Geral.....   | 39 |
| Conclusão.....   | 43 |
| Referências.....   | 44 |
| Anexo.....   | 48 |

## 1.INTRODUÇÃO

As injúrias ao complexo maxilofacial representam um importante problema de saúde em todo o mundo. As fraturas faciais estão associadas geralmente com severa morbidade, perda de função, desfiguramento, e significativo custo financeiro<sup>1</sup>. A mandíbula é a região mais acometida pelos traumas ao esqueleto facial, sendo acometida em 36 a 70% dos casos<sup>2</sup>. Este alto grau de envolvimento pode ser explicado devido a características da mandíbula como sua mobilidade e suporte ósseo limitado comparado aos outros ossos faciais<sup>3</sup>.

Dentre as regiões mandibulares mais afetadas, estão o côndilo e a sínfise mandibular. As fraturas condilares totalizaram 25 a 45% das fraturas mandibulares<sup>4,5</sup>. Por sua vez, a região da sínfise apresentou uma ocorrência de 9 a 57% dos envolvimento traumáticos da mandíbula de acordo com os estudos de Murthy e Lehman<sup>6</sup> e de Scolozzi e Richter<sup>7</sup> respectivamente.

A ocorrência concomitante das fraturas condilares e da sínfise mandibular também é uma associação comum dentre as fraturas faciais<sup>8</sup>. O estudo de Morris e colaboradores<sup>9</sup> de 2015, ao avaliar 2.828 pacientes, encontrou um total de 50,42% de envolvimento mandibular com fraturas múltiplas. Dentre estes casos, dos 832 que apresentaram fraturas condilares e sub condilares, 51,9% também possuíam fratura da sínfise. Entretanto, dos 565 pacientes que apresentavam fraturas da região da sínfise, as fraturas condilares foram encontradas em 38,2% dos casos. Dessa forma, fica clara a necessidade de estabelecimento de protocolos de tratamentos previsíveis para esse tipo de fratura associada.

O tratamento destas fraturas vem sendo realizado há mais de duas décadas pela fixação interna estável ou fixação interna rígida, através da instalação de placas e parafusos de titânio. A redução aberta associada a esta fixação permite restaurar a função, com restabelecimento da anatomia e estabilidade da fratura<sup>10</sup>. Embora o tratamento das fraturas condilares ainda possa gerar controvérsias, assim como seu diagnóstico e classificação<sup>11</sup>, a redução aberta e fixação interna estável tornou-se padrão para as fraturas com deslocamento em pacientes adultos, quando há envolvimento da região de pescoço e base do côndilo. Para as fraturas intracapsulares a opção do tratamento conservador (não cirúrgico) ainda é a escolha principalmente quando não há limitação funcional<sup>12</sup>. Neste tipo de tratamento é

realizado fisioterapia para manutenção dos movimentos funcionais, e não o acesso cirúrgico para redução e fixação da fratura.

Para a fixação condilar, a técnica que utiliza duas miniplacas tem mostrado promover uma fixação mais estável em estudos biomecânicos<sup>13</sup>, uma vez que é capaz de neutralizar as forças de tração e compressão<sup>14, 15</sup>. Entretanto, a dificuldade de inserção das miniplacas e parafusos pode ser uma desvantagem dependendo do tamanho do fragmento proximal. Quando é possível a utilização de apenas uma miniplaca, Asprino e colaboradores<sup>16</sup> sugerem que a fixação com esta miniplaca seja com parafusos maiores, de 8mm. Atualmente, as miniplacas Delta e Trapezoidais tem sido incluídas nos estudos clínicos e biomecânicos, principalmente por apresentarem estabilidade suficiente, apesar do menor tamanho<sup>10</sup>.

Em relação às fraturas da região da sínfise, a utilização de duas miniplacas de quatro furos, dois de cada lado da linha de fratura, fixadas por parafusos monocorticais na zona de compressão, região mais superior, e por parafusos bicorticais na zona de tração, base da mandíbula tem sido a escolha inicial de fixação, por atuar tanto na zona de tração quanto na de compressão, promovendo condições favoráveis à consolidação óssea<sup>17</sup>. Outros tipos de fixação, como a técnica Lag Screw, também têm mostrado excelentes resultados em análises biomecânicas para a fixação das fraturas da sínfise mandibular. A fixação com apenas uma miniplaca mostrou menor resistência na fixação das fraturas de sínfise<sup>18,19</sup>. Isoladamente, cada uma destas fraturas, côndilo e sínfise, tem sido estudada através de análises biomecânicas ou por análise de elementos finitos com o objetivo de selecionar um sistema apropriado com máxima estabilidade e mínimo trauma durante sua inserção<sup>20</sup>. Contudo, até o presente momento, não foram encontrados estudos publicados que mostraram uma avaliação da fixação de fraturas quando se encontram associadas e o comportamento mecânico destas.

A análise pelo método dos elementos finitos é a realizada através de softwares específicos, em computador. Estes programas são capazes de transformar imagens de tomografia computadorizada em modelos tridimensionais virtuais. Quando estes modelos são subdivididos em pequenas partes, denominadas de elementos, o computador é capaz de resolver um problema de dimensões complexas através de uma série de problemas menores, porém interligados. Estas divisões podem apresentar formas diferentes, como triangular, quadrilateral, entre outras, que são interligados por pontos, chamados nós ou pontos nodais. Ou seja, é um método

numérico para resolução de problemas complexos. Desta forma, pode-se analisar o comportamento destes elementos quando submetidos a uma carga dinâmica, por exemplo. Por isso, este método tem sido utilizado para análises de distribuição de cargas em estruturas como a mandíbula. Este tipo de análise pode demorar de horas a dias para ser finalizada, e depende da complexidade do modelo. Uma escala de cores, gerada por um dos softwares, permite a visualização da distribuição de tensões e deslocamentos gerados quando a estrutura é submetida à carga.

Embora a confecção do modelo de elementos finitos exija algumas pressuposições com relação ao detalhamento da geometria óssea e dos parafusos, propriedades dos materiais, e interface entre o osso e o parafuso<sup>21,22</sup>, a semelhança entre estes modelos e às situações clínicas reais justifica sua utilização nos estudos da área odontológica<sup>23</sup>.

Ainda que estudos isolados de cada tipo de fratura evidenciem métodos mais estáveis das fixações da sínfise e côndilo, não foram encontrados na literatura estudos que avaliaram a estabilidade das fixações no tratamento dessas fraturas associadas. O estudo destas fixações possibilita analisar o comportamento destes materiais frente às forças às quais a mandíbula é submetida durante os movimentos funcionais.

## **1. OBJETIVO**

O objetivo deste estudo foi avaliar comparativamente três combinações diferentes de fixação de fraturas associadas das regiões do côndilo e da sínfise mandibular num total de nove combinações por meio do método dos elementos finitos.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### *Obtenção dos modelos de elementos finitos*

Para este estudo foi utilizado um modelo de elementos finitos tridimensional confeccionado a partir de uma mandíbula humana de um homem adulto que não apresentava anomalias craniofaciais.

Este modelo virtual foi obtido através da utilização de softwares específicos capazes de reproduzir as imagens obtidas em cortes tomográficos axiais em uma malha de representação. Após reconstruir tridimensionalmente as imagens DICOM, o software InVesalius (version 2.1; CTI, Ministério da Ciência e Tecnologia, Campinas, SP, Brazil) permitiu a geração de arquivos 3D no formato STL. A partir do modelo STL, foi possível a obtenção da geometria CAD, utilizando-se o software Rhinoceros (version 4.0, Robert McNeel and Associates, Seattle, WA, USA), e com este formato de imagem pode ser realizada a simulação de elementos finitos, no programa ANSYS (ANSYS Workbench, version 14.0; Canonsburg, PA, USA).

Neste estudo, todos os materiais utilizados foram considerados isotrópicos, homogêneos e linearmente elásticos. As propriedades mecânicas foram descritas através do módulo de elasticidade de Young e do coeficiente de Poisson. Para o osso cortical os valores foram  $E = 13.700$  MPa e  $\nu = 0.3$ , e para o osso medular  $E = 7.930$  MPa e  $\nu = 0.3$ . Estes valores foram baseados em estudo prévio de Fernandez et al., 2003.

### *Simulação das fraturas mandibulares*

Nas regiões da sínfise e côndilo mandibulares foram simuladas áreas que corresponderam às áreas fraturadas. Nestes pontos, as superfícies estavam em contato, mas livres para deslocamento ou separação. Essas fraturas foram devidamente padronizadas quanto à sua localização e extensão para todas as análises.

### *Protocolos de Fixação Interna Estável*

As regiões de fratura receberam modelos igualmente confeccionados de miniplacas e parafusos de titânio, simulando a fixação interna estável (Figura 1). Na região de sínfise mandibular foram utilizadas para fixação 3 métodos: duas miniplacas



dispostas paralelamente (PAR), duas miniplacas dispostas perpendicularmente (PER), e a técnica Lag Screw (LAG). Para a região condilar, foram utilizadas: placa trapezoidal, duas miniplacas e uma miniplaca. As miniplacas e parafusos de titânio tiveram seus modelos baseados em placas do sistema 2.0 mm, e parafusos mono e bicorticais do mesmo sistema com  $E = 115.000 \text{ MPa}$ , e  $\nu = 0.34$  (SYNTHESES, West Chester, PA)

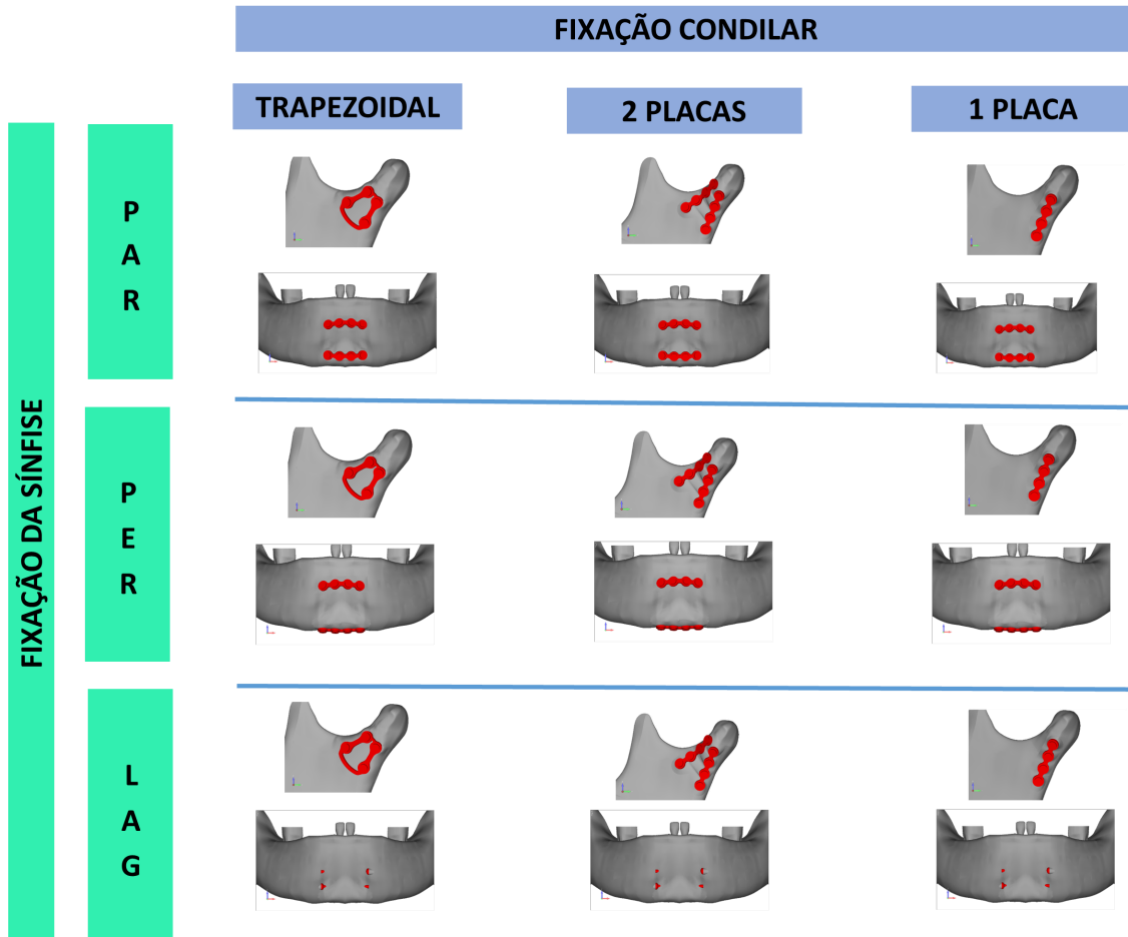


Figura 1: Métodos de fixação de acordo com os grupos. PAR – Duas Placas Paralelas; PER – Duas Placas Perpendiculares.

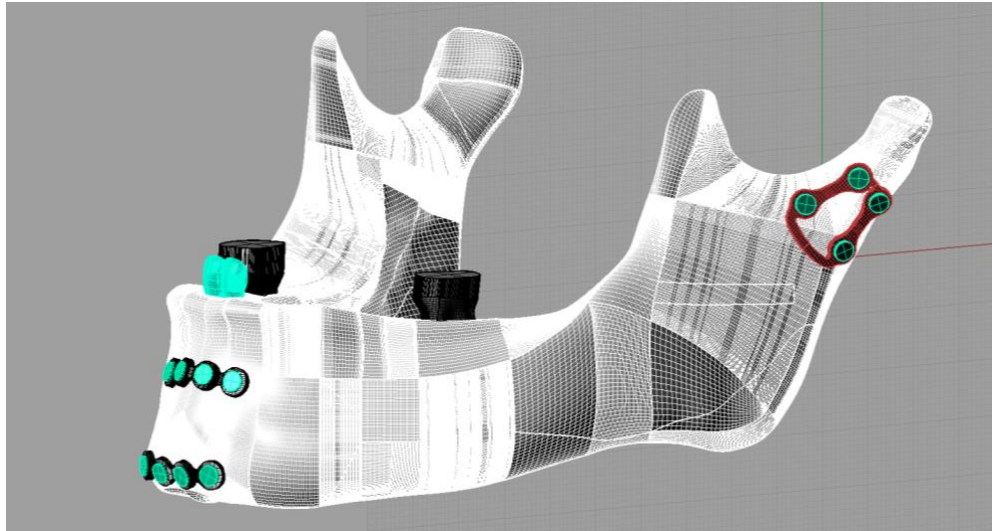


Figura 2: Exemplo do grupo com fixação das placas paralelas na região da sínfise, e placa trapezoidal na região condilar.

Após devidamente preparados, os modelos foram fixados na região da articulação mandibular. A região do primeiro molar inferior contralateral à fratura condilar recebeu, então, uma carga perpendicular ao longo eixo do dente, no valor de 135N, que representa a média da força de mordida nesta região em um adulto no pós-operatório de até 6 semanas<sup>24</sup>.

#### *Análise por meio do método dos elementos finitos*

Após a aplicação da força, foram determinados os valores para análise de von Mises para as placas e parafusos e máxima tensão para o tecido ósseo, utilizando a razão  $\text{N/mm}^2$  em MPa. Os modelos testados foram comparados quali e quantitativamente, identificando-se o comportamento dos protocolos de fixação quanto ao deslocamento e distribuição da tensão. Uma escala de cores indica a concentração das tensões. Áreas em azul representam valores baixos, enquanto que áreas em vermelho evidenciam altos valores de estresse.

### 3. RESULTADOS

#### Artigo publicado no *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*

*J Oral Maxillofac Surg.*2017 Nov;*75*(11):2399-2410. doi:10.1016/j.joms.2017.06.021. Epub 2017 Jun 24

#### Finite element evaluation of stable fixation in combined mandibular fractures

##### Abstract:

**Purpose:** The fixation of combined mandibular fractures, especially symphysis-condyle fracture, although a common occurrence and higher complication rate in clinic, is rarely investigated regarding predictable therapeutic approaches. Thus, the present study's aim was to assess different forms of condyle fixation when combined with symphysis fracture fixation. **Methods:** Stress distribution that occurs when a condyle fracture is fixed using one miniplate, two miniplates, or a trapezoidal condyle miniplate and when symphyseal fracture is fixed using two parallel plates, two perpendicular plates or two lag-screws were analyzed by FEM. The null hypothesis was no differences in among different fixation techniques. **Results:** The results showed stress concentration in the anterior region of condyle, close to the sigmoid notch. Moreover, adequate fixation in the symphysis could result in less tension in condyle region. Therefore, when the symphysis was fixed with Lag screw technique, the condyle fixation was less required, showing more adequate stress distribution when the condyle was fixed with one or two plates. Inversely, when the symphysis fixation was less effective, using perpendicular plates, there was a change in stress distribution on condyle region, altering fixation behavior, resulting in more tension and displacement in condyle, especially when trapezoidal plate was used. **Conclusion:** In conclusion, the lag-screw and parallel double plates appear to be suitable for symphyseal fixation, while two straightly positioned plates and a trapezoidal plate are suitable for condyle fixation. However, the combination of perpendicular plates in symphysis fixation and a trapezoidal plate in condyle fixation demonstrated altered stress distribution.

## Introduction

Injuries of the maxillofacial complex represent an important health problem worldwide. Particular interest has been generated by the high incidence and diversity of facial lesions. Moreover, maxillofacial fractures are often associated with severe morbidity, loss of function, disfigurement, and significant financial cost<sup>1,2</sup>. Mandible fractures are among the most common injuries that affect the facial skeleton<sup>3</sup>, with 36% to 70% of facial trauma involving the mandible<sup>4</sup>. This high rate of fractures can be explained by the unique characteristics of the mandible, such as its mobility and limited bone support compared to other facial bones<sup>5</sup>.

The prevalence of the mandibular area being affected by fractures during facial trauma is controversial and requires caution when different locations are compared<sup>6-8</sup>. In epidemiologic studies, the symphyseal and condyle regions were the mandibular areas that were most affected by fractures<sup>6,8,9</sup>. However, an important characteristic to be considered in fracture occurrence, diagnosis and treatment is the concomitant occurrence of fractures. Morris et al<sup>10</sup> analyzed 2,828 patients and identified a multiple mandibular fracture in 50.42% of the cases. Interestingly, from the 832 cases with a condyle/sub-condyle fracture, symphysis fractures were concomitantly founded in 51.9% of the cases. Inversely, in the total of 565 symphyseal fractures, condyle/sub-condyle fractures were found in 38.2% of the cases. The occurrence of symphysal/condylar, in specially bicondylar, are a hard-to-deal with condition, due to the increase in splaying phenomena, a loss of posterior facial height could occurs and worsens the lack of the sagittal dimension<sup>11</sup>. Thus, a therapeutic approach should consider the simultaneous occurrence of these fractures.

Treatment of mandibular fractures is based on the restoration of form and function with the aim of suitable bone repair. With this intention, open reduction with stable internal fixation has been the treatment of choice<sup>12</sup>. Studies have provided several possibilities isolated fracture fixation, for example, lag-screw or straight miniplates for symphysys and trapezoidal, delta, lambda and straight miniplates for condyle fixation<sup>12</sup>. The focus of these studies is improving and facilitate surgical approach once these fractures usually involved areas of restrict surgical access and some complications as hemorrhagic and infections events, facial nerve paralysis and Frey's syndrome (for condyle fracture treatment), altered transversal dimension (in symphysal fractures) and wound scars in aesthetic area<sup>11, 13</sup> can occurs and what might be considered in clinical decision-making process. When testing novel approaches, several points should be addressed, within them stress distribution, using biomechanical tests or finite element models (FEM) analysis are important possibilities. FEM is considered a technique that create a precise mathematical model<sup>14</sup>, using computer generate models, widely used in maxillofacial surgery literature, used to investigate cranio-

maxillofacial fractures (CMF) fixation, temporal-mandibular joint behavior, dental implants and orthognathic surgery models<sup>15-17</sup>. However, regarding CMF fractures, although several studies have tested fracture fixation in isolated symphyseal and condyle regions<sup>18-23</sup>, there has been no study assessing the impact of simultaneous fractures. However, this issue is important because each mandibular region presents a specific behavior during force application and, probably, multiple fractures, and the treatment of each fracture could affect the mandibular force distribution. Thus, this study aimed to evaluate the biomechanical behavior of different methods of osteosynthesis of condyle and symphyseal fractures through finite element analysis.

## **Materials and Method**

### *FEM analysis*

FEM methodology followed the sequence fully explained in a previous study of our group<sup>23</sup>. Briefly, a human mandible without anomalies were used as standard for a three-dimensional model generation (Supplemental file 1). This step initiate with a computed tomography of mandible and DICOM files obtained used for modeling in Centre for Information Technology (CTI; Renato Archer Information Technology Centre, Campinas, SP, Brazil). This model was initially created using InVesalius (version 2.1; CTI, Ministry of Science and Technology, Campinas, SP, Brazil) and Rhinoceros softwares (version 4.0, Robert McNeel and Associates, Seattle, WA, USA). Later, model was exported for FEM analysis (ANSYS Workbench, version 14.0; Canonsburg, PA, USA). A perfect linear symphysis fracture in the middle of the jaw and a linear condylar base fracture on the left side were simulated in the mandibular model for this study. The present study used a 'tetrahedral with 10 nodes' (Tet10) for FEM analysis. At structures close to fractures and fixation elements (adjacent bone, plates and screws) a close-up view on stress distribution, displacements and other alteration were done, in view of smaller element sizes and the importance in analysis. The same process was used for plates and screws using digital models provided by the manufacturer (Synthes, Basel, Switzerland). Both plates and screws were made of commercially pure titanium and their virtual models were used to simulate the osteosynthesis of the symphysis and condylar fractures created in the mandibular model. Regarding bone tissue model structure a cortical structure of 2mm-thickness was considered and was not applied any pre-tension in this FEM analysis.

### *Properties of materials*

A homogeneous, isotropic and linear elastic model<sup>24</sup> was considered. According to previous studies for this analysis<sup>25,26</sup>, the necessary mechanical properties required the Young's module ( $E$ ) and the Poisson coefficient ( $\nu$ ) to be  $E=13,700$  MPa and  $\nu=0.3$  for cortical bone,  $E=7,930$  MPa and  $\nu=0.3$  for medullary bone, and  $E=115,000$  MPa and  $\nu=0.34$  for plates and screws (considering they had similar properties). At this FEM model, no masticator muscles, bone-to-bone and bone-plate friction aspects were considered for stress distribution analysis.

### *Types of osteosynthesis tested and loads*

Three types of fixation were tested for the symphysis: two straight non-locking four-hole plates positioned in two different ways, i.e., parallel double plates or perpendicular double plates, and a lag screw technique. All plates and screws were 2.0mm of thickness. Parallel double plates were stabilized with four 6 mm screws in the upper edge region, and with 12 mm screws in the inferior plate. Perpendicular double plates were fixed with 6 mm screws to each other. In the lag screw technique two 20 mm screws were used. For the condyle fixation, three different conditions were tested: one straight non-locking four-hole plate, two straight non-locking four-hole plates, and a trapezoidal plate. All these plates were stabilized with 8 mm screws.

Previously, forces on both the ipsilateral and contralateral sides (fractured condyle) were applied to determine the critical side for the present study condition. Thus, a contralateral side of the fracture was choose. For tension stimuli, a simplified 135 N force was perpendicularly applied at occlusal area of the first molar. This load corresponds to the bite force values obtained within the first 6 postoperative weeks, according to previous studies<sup>27,28</sup>. Mandibular movements were restricted at the condyles in all directions, and the fracture interface (proximal and distal segments) was in contact but free to displace or separate<sup>23</sup>.

Furthermore, it was assumed that the plates did not receive or transmit any force directly from the bone segments; rather, the chain of force transfer was defined as progressing from bone to screw, from screw to plate, and finally returning via the screws back to the bone<sup>26</sup>.

### *Analysis of results*

After force application, von Mises' analysis were determined for the plates and screws and maximum tension for bone, using a ratio in MPa ( $\text{N/mm}^2$ ) at main tension. A color scale with tension values varying in MPa was used. The tested models were compared qualitatively and quantitatively, identifying the behavior of the fixation protocols regarding their displacement and distribution of tensions.

## Results

### *Analysis of tension distribution and displacement in symphyseal fractures*

In Figure 1, no significant displacement could be observed in any of the fixation protocols, with only a discreet displacement observed in perpendicular fixation when the condyle was fixed with a trapezoidal plate. However, the analysis of tension from the screws to bone, i.e., with maximum tension, showed a lower stress concentration in lag-screw fixation when compared to parallel or perpendicular fixation (in spite of condyle fixation). Therefore, it should be highlighted that there is a trend to similar tension distribution with lag-screw fixation and parallel plate fixation independent of the condyle fixation groups, what could also be noted at numerical values of maximum tension (Table 1). Inversely, in perpendicular fixation, there was a more robust change in the tension distribution when the condyle was fixed with one or two straight plates or a trapezoidal plate. There was a tension concentration in the bone fracture line when the symphysis was fixed with perpendicular plates combined with trapezoidal plate fixation in condyle fractures. When one or two plates were used in condylar fixation, the tension was concentrated around the screws (especially in the central holes), with a similar stress distribution between them (Figure 1 and Table 1).

In general, von Mises' analysis (screw and plate tension analysis) showed a trend to present higher tension in the inferior plates (or inferior lag-screw) than in the superior plates. Higher values were observed in central holes and at the middle of the lag-screw and, inversely to bone tension analysis, lesser values were obtained in perpendicular symphyseal fixation when the condyle was fixed with a trapezoidal plate compared to the other groups, especially in screws (Figure 2 and Table 1), indicating a concentrated stress in the bone area and not in the plates/screws. In the screw analysis (Figure 2), a clear lower stress concentration was observed in the perpendicular plate groups than in the parallel plates.

### *Analysis of tension distribution and displacement in condylar fractures*

Displacement analysis showed great value for condyle fractures, especially when fixed with a trapezoidal plate, in spite of symphyseal fixation. However, the impact of symphyseal fixation is clear in condyle fixation behavior, because a great displacement was noted when perpendicular plates were used in symphysis.

Overall, maximum tension analysis revealed a stress concentration at the sigmoid notch in all groups. However, one plate fixation showed a larger area of stress than the other groups, despite symphyseal fixation (Figure 3). The two plates, as well as the trapezoidal plate, showed a tension peak at the anterior plate/hole area, closer to the sigmoid notch. Interestingly, with one and two plate condyle fixation, no significant difference in tension analysis could be noted regarding symphyseal fixation. However, in trapezoidal plate samples, the condyle stress distribution could be affected by symphysis fixation and higher tension values were observed in distal fragments when the perpendicular plates were used for symphyseal fixation rather than parallel plates or lag-screws. These results indicate an altered stress distribution behavior. When one plate fixation, the stress is concentrated in a large area at mesial region of condyle. Inversely, when two plates or trapezoidal plate, the stress is concentrated at plates and screws and at bone around them. This result could be seen at table 1 in which a higher Von Mises' values were seen at two plates and trapezoidal plate condyle fixation.

Von Mises' analysis corroborated this finding. Slight tension was observed in the trapezoidal plate when perpendicular fixation was used in symphysis compared to parallel or lag-screw fixation, with no significant difference between them (Figure 4). Moreover, no robust differences in plate tension were observed when two parallel or lag-screw fixation methods were used in symphysis. The same could be applied for screws in the von Mises analysis, although a lower tension could be noted for screws in condylar fixation using one plate when symphysis was fixed with a lag-screw (Figure 4 and Table 1).

### **Discussion**

A recent meta-analysis indicated that open reduction and rigid internal fixation provides superior functional clinical outcomes compared with closed treatment in the management of adult condylar fractures<sup>29</sup>, highlighting the importance of obtaining the most predictable protocol for fixation. One of the most used forms to test fixation models is finite element analysis. However, although a common finding in epidemiological studies<sup>10</sup>, there was no study in the literature assessing combined fracture fixation protocols. Thus, the present



study aimed to determine the behavior of different protocols for the fixation of combined symphyseal and condylar fractures and the possible impact of each fracture on the stability of another. It was hypothesized that, when applying a contralateral force, a sequential force will occur first at the symphyseal area and then at the condyle region. Thus, any alteration in the force distribution at symphysis fixation would consequently affect the condyle region. The results of the present study confirmed this hypothesis, indicating a relationship between fracture fixation approaches and internal rigid fixation stability.

Our data indicated that for symphyseal fixation, both lag-screw and two parallel plates produce similar stress distributions despite the condyle fixation technique. In a previous study by our group<sup>22</sup>, with a biomechanical analysis, a lag-screw technique promoted the highest value of load, corroborating other studies that confirmed this approach as an adequate option for symphyseal fixation and post-operative reduced complications<sup>21, 30</sup>. Lag screws lead to traction of the stumps, promoting compression and fixation of the fracture<sup>31</sup>. The type of compression generated by a lag screw is referred to as *static interfragmental compression*, which does not change significantly with load<sup>32</sup>. However, two parallel plates also promoted an adequate stability of fixation, as also found by other authors<sup>19,33</sup>, although more stress peaks could be noted in the symphyseal bone region. Several studies, including clinical trials, confirmed that lag-screw and parallel double plates are adequate therapeutic options for symphyseal fracture fixation<sup>19, 33-35</sup>.

However, contrarily to previous studies by our group and previous FEM and clinical studies<sup>20,22,36</sup>, two perpendicular plates for symphyseal fracture fixation promoted worse results for stress distributions and fracture displacement (presenting stress concentrations at the fracture border lines and significant displacement) compared to lag-screw and parallel plate approaches. With this fixation, similar to parallel fixation, plates are placed on tension and compression zones, which might promote adequate fixation. However, in this FEM analysis, the fixation methods had distinct behaviors. It is suggested that, when perpendicular plates are used, fixation of the symphysis is not able to adequately resist bending movements and torsion forces, which, are the most important biomechanical movements occurring in the anterior region of the mandible, according to Tams et al.<sup>37</sup>. Meanwhile, the most important aspect to be considered in this study is the fact that the lower stability occurring in symphyseal fixation with perpendicular plates appears to alter the behavior of condyle fixation.

Because lag-screw and parallel plate fixation did not show significant differences in symphyseal stress distributions in the different condyle fixation protocols, it could be assumed that the differences observed in condyle stress distributions were associated with the type of fixation applied (one and two straight or one trapezoidal plates). In this analysis, it

was clear that one plate fixation does not promote an adequate stress distribution, independently of symphyseal fixation, and a larger area of tension could be noted at the sigmoid notch. Some studies corroborated that one straight plate is unsuitable as a condylar fracture fixation technique<sup>38,39</sup>, and this technique could be considered as a control. Consensually, two plates inserted straight are considered as a predictable approach for condylar fixation regarding stability and displacement<sup>19, 40-43</sup>. Similar to the present study, a recent study also indicated a higher concentration of tension dissipated in the fixation material and bone<sup>20</sup>. The anterior plate border presented an area of greater tensile stress<sup>18,43</sup> with tensions transmitted both to the screws and the regions of insertion of the screws into the bone.

The most outstanding result was the alteration in trapezoidal plate fixation behavior with the different symphyseal fixation methods. The trapezoidal plate is a clinically interesting approach because it occupies less space, facilitating an endoscopically assisted technique, and some FEM studies showed the suitability of trapezoidal plates in subcondylar fractures fixation<sup>23,39,43,44</sup>. Trapezoidal plates were proposed based on previous studies of biomechanical behavior of the mandible<sup>43,44</sup>, suggesting that osteosynthesis should follow certain ideal lines on the mandible to achieve maximum rigid fixation. This model indicates that the lateral arms of the trapezoidal plate should be perpendicular to the contours of displacement and that the 2 bases of the plate should be parallel to the displacement contours<sup>43,44</sup>. Therefore, probably due to this intimate relationship, the trapezoidal plate was the fixation method most affected by the symphyseal condition. The worst result for displacement in condyle fixation was observed with trapezoidal fixation combined with perpendicular symphyseal fixation.

This phenomenon could be attributed to biomechanical characteristics in fracture condyle/symphysis. In a non-fractured mandible, the forces during unilateral molar biting result in a combination of sagittal bending, torsion and lateral transverse bending<sup>45</sup>. Thus, because perpendicular symphyseal fixation appears to not adequately control torsion movement and bending moments, the condyle region could suffer an alteration in the force distribution. Consequently, the trapezoidal plate that might be fixed in specific lines of force concentration could have this stabilization capacity affected, resulting in greater displacement. This is clear when comparing the trapezoidal plate fixation combined with perpendicular plates to the same condyle fixation associated with lag-screw and/or parallel plates. Regarding two straightly distributed plates in condyle fixation, this alteration in biomechanical behavior could be less important and may not affect its fixation quality once no significant alteration in stress or displacement was noted when the symphysis was fixed with a perpendicular approach. Meanwhile, the von Mises analysis did not differ from previous studies. A greater concentration of tension was observed on the bone around the anterior arm of the plate and compression at

the posterior arm. A high screw stress was noted at both anterior arms and at the most upper screws. However, Pilling et al.<sup>46</sup>, Lauer et al.<sup>47</sup> and de Jesus et al.<sup>23</sup> did not obtain improved results compared to two straightly positioned plates. De Jesus et al.<sup>23</sup> suggested that, because only one screw is used on each side of the fracture, the tension on the screws and over the bone could become much higher, which may result in complications under high loading forces. In general, in view of the FEM analysis performed in the present study, this combination, i.e., perpendicular symphyseal fixation and trapezoidal condylar fixation, might be avoided, as well as one plate fixation in the condyle and perpendicular fixation in the symphysis. This could help clinicians choose the best fixation model for combined fractures. However, the results should be considered with caution. Although FEM analysis is an important tool to obtain answers and develop new forms to deal with facial fracture, this is a computational modeling approach. At this FEM model, for example, no masticator muscles, bone-to-bone and bone-plate friction aspects were considered for stress distribution analysis. This intrinsic limitation of FEM studies highlight the need of biomechanical and controlled clinical trials to confirm the results, especially because this is the first study that showed this interaction in mandibular condyle-symphysis fracture fixation.

In conclusion, within the limits of this study, the lag-screw and parallel double plates appear to be suitable for symphyseal fixation, while two straightly positioned plates and a trapezoidal plate are suitable for condyle fixation. Moreover, according to FEM analysis, the symphyseal fixation with perpendicular plates appears to alter stress distribution and negatively affect condylar trapezoidal plate fixation.

### **Acknowledgments**

This study was funded by AO-Craniofacial section (Grant AOCMF-13-33P). The authors declare no conflict of interest. All authors had viewed and reviewed the manuscript prior submission.

## References

1. Qudah MA, Bataineh AB: A retrospective study of selected oral and maxillofacial fractures in a group of Jordanian children. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 94:310, 2002
2. Kieser J, Stephenson S, Liston PN, Tong DC, Langley JD: Serious facial fractures in New Zealand from 1979 to 1998. *Int J Oral Maxillofac Surg* 31:206, 2002
3. Ellis E 3<sup>rd</sup>, Moos KF, el-Attar A: Ten years of mandibular fractures: an analysis of 2,137 cases. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 59:120, 1985
4. Hogg NJ, Stewart TC, Armstrong JE, Girotti MJ: Epidemiology of maxillofacial injuries at trauma hospitals in Ontario, Canada, between 1992 and 1997. *J Trauma* 49:425, 2000
5. Ellis E 3<sup>rd</sup>: Lag screw fixation of mandibular fractures. *J Craniomaxillofac Trauma* 3:16, 1997
6. Brasileiro BF, Passeri LA: Epidemiological analysis of maxillofacial fractures in Brazil: a 5-year prospective study. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*. 102:28, 2006
7. Eskitascioglu T, Ozyazgan I, Coruh A, Gunay GK, Yuksel E: Retrospective analysis of two hundred thirty-five pediatric mandibular fracture cases. *Ann Plast Surg* 63:522, 2009
8. Afrooz PN, Bykowski MR, James IB, Daniali LN, Clavijo-Alvarez JA: The Epidemiology of Mandibular Fractures in the United States, Part 1: A Review of 13,142 Cases from the US National Trauma Data Bank. *J Oral Maxillofac Surg* 73:2361, 2015
9. Munante-Cardenas JL, Facchina Nunes PH, Passeri LA: Etiology, treatment, and complications of mandibular fractures. *J Craniofac Surg* 26:611, 2015
10. Morris C, Bebeau NP, Brockhoff H, Tandon R, Tiwana P: Mandibular fractures: an analysis of the epidemiology and patterns of injury in 4,143 fractures. *J Oral Maxillofac Surg* 73:951, 2015
11. Gerbino G, Boffano P, Bosco GF: Symphyseal mandibular fractures associated with bicondylar fractures: a retrospective analysis. *J Oral Maxillofac Surg* 67:1656, 2009

12. Al-Moraissi EA, Ellis E: Surgical management of anterior mandibular fractures: a systematic review and meta-analysis. *J Oral Maxillofac Surg* 72:e1, 2014
13. Hammer B1, Schier P, Prein J: Osteosynthesis of condylar neck fractures: a review of 30 patients. *Br J Oral Maxillofac Surg* 35:288, 1997
14. Zienkiewics OC, Taylor RL: El metodo de los elementos finites, 5th Ed. Barcelona, CIMNE, 2004.
15. Devocht JW, Goel VK, Zeitler DL, Lew D: Experimental validation of a finite element model of the temporomandibular joint. *J Oral Maxillofac Surg* 59:775, 2001
16. Bohluli B, Motamedi MH, Bohluli P, Sarkarat F, Moharamnejad N, Tabrizi MH: Biomechanical stress distribution on fixation screws used in bilateral sagittal split ramus osteotomy: assessment of 9 methods via finite element method. *J Oral Maxillofac Surg* 68:2765, 2010
17. Dai Z, Hou M, Ma W, Song DL, Zhang CX, Zhou WY: Evaluation of the Transverse Displacement of the Proximal Segment After Bilateral Sagittal Split Ramus Osteotomy With Different Lingual Split Patterns and Advancement Amounts Using the Finite Element Method. *J Oral Maxillofac Surg* 74:2286.e1, 2016
18. Wagner A, Krach W, Schicho K, Undt G, Ploder O, Ewers R: A 3-dimensional finite-element analysis investigating the biomechanical behavior of the mandible and plate osteosynthesis in cases of fractures of the condylar process. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 94:678, 2002
19. Asprino L, Consani S, de Moraes M: A comparative biomechanical evaluation of mandibular condyle fracture plating techniques. *J Oral Maxillofac Surg* 64:452, 2006
20. Kimura A, Nagasao T, Kaneko T, Tamaki T, Miyamoto J, Nakajima T: Adequate fixation of plates for stability during mandibular reconstruction. *J Craniomaxillofac Surg* 34:193, 2006
21. Madsen MJ, McDaniel CA, Haug RH: A biomechanical evaluation of plating techniques used for reconstructing mandibular symphysis/parasymphysis fractures. *J Oral Maxillofac Surg* 66:2012, 2012
22. Vieira e Oliveira TR, Passeri LA: Mechanical evaluation of different techniques for symphysis fracture fixation--an in vitro polyurethane mandible study. *J Oral Maxillofac Surg* 69:e141, 2011

23. de Jesus GP, Vaz LG, Gabrielli MF, Passeri LA, V Oliveira T, Noritomi PY, Jürgens P: Finite element evaluation of three methods of stable fixation of condyle base fractures. *Int J Oral Maxillofac Surg* 43:1251, 2014
24. Beer FP, Johnston ER, Dewolf JT, Mazurek DF: *Mechanics of materials*. 6th ed. New York, NY, McGraw-Hill, 2012, pp.25
25. Fernandez R, Gallas M, Burguera M, Viano JM: A three-dimensional numerical simulation of mandible fracture reduction with screwed miniplates. *J Biomech* 36:329, 2003
26. Ji B, Wang C, Liu L, Long J, Tian W, Wang H: A biomechanical analysis of titanium miniplates used for treatment of mandibular symphyseal fractures with the finite element method. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 109:21, 2010
27. Tate GS, Ellis E 3rd, Throckmorton G: Bite forces in patients treated formandibular angle fractures: implications for fixation recommendations. *J Oral Maxillofac Surg* 52:734, 1994
28. Gerlach KL, Schwarz A: Bite forces in patients after treatment of mandibular angle fractures with miniplate osteosynthesis according to Champy. *Int J Oral Maxillofac Surg* 31:345, 2002
29. Al-Moraissi EA, Ellis E 3rd: Surgical treatment of adult mandibular condylar fractures provides better outcomes than closed treatment: a systematic review and meta-analysis. *J Oral Maxillofac Surg* 73:482, 2015
30. Goodday RH: Management of fractures of the mandibular body and symphysis. *Oral Maxillofac Surg Clin North Am* 25:601, 2013
31. Tiwana PS, Kushner GM, Alpert B: Lag screw fixation of anterior mandibular fractures: a retrospective analysis of intraoperative and postoperative complications. *J Oral Maxillofac Surg* 65:1180, 2007
32. Prein J, Rahn BA: *Manual of Internal Fixation in the Cranio-Facial Skeleton: Scientific and technical background*. 1 ed. Berlin, Springer Verlag, 1998, pp 1
33. Ellis E 3<sup>rd</sup>: Is lag screw fixation superior to plate fixation to treat fractures of the mandibular symphysis? *J Oral Maxillofac Surg* 70:875, 2012
34. Bhatnagar A, Bansal V, Kumar S, Mowar A: Comparative analysis of osteosynthesis of mandibular anterior fractures following open reduction using stainless steel lag screws and mini plates. *J Maxillofac Oral Surg* 12:133, 2013

35. Oliver R: Lag screw fixation of mandibular symphysis fractures is associated with fewer post-operative complications compared to plates and screws. *J Evid Based Dent Pract* 13:20, 2013
36. Rahpeyma A, Khajehahmadi S, Barkhori Mehni S: Treatment of mandibular fractures by two perpendicular mini-plates. *Iran J Otorhinolaryngol* 26:31, 2014
37. Tams J, van Loon JP, Rozema FR, Otten E, Bos RR: A three-dimensional study of loads across the fracture for different fracture sites of the mandible. *Br J Oral Maxillofac Surg* 34:400,1996
38. Tominaga K, Habu M, Khanal A, Mimori Y, Yoshioka I, Fukuda J: Biomechanical evaluation of different types of rigid internal fixation techniques for subcondylar fractures. *J Oral Maxillofac Surg* 64:1510, 2006
39. Darwich MA, Albogha MH, Abdelmajeed A, Darwich K: Assessment of the Biomechanical Performance of 5 Plating Techniques in Fixation of Mandibular Subcondylar Fracture Using Finite Element Analysis. *J Oral Maxillofac Surg* 74:794.e1, 2016
40. Parascandolo S, Spinzia A, Parascandolo S, Piombino P, Califano L: Two load sharing plates fixation in mandibular condylar fractures: biomechanical basis. *J Craniomaxillofac Surg* 38:385, 2010
41. Aquilina P, Chamoli U, Parr WC, Clausen PD, Wroe S: Finite element analysis of three patterns of internal fixation of fractures of the mandibular condyle. *Br J Oral Maxillofac Surg* 51:326, 2013
42. Conci RA, Tomazi FH, Noritomi PY, da Silva JV, Fritscher GG, Heitz C: Comparison of Neck Screw and Conventional Fixation Techniques in Mandibular Condyle Fractures Using 3-Dimensional Finite Element Analysis. *J Oral Maxillofac Surg* 73:1321, 2015
43. Meyer C, Kahn JL, Boutemi P, Wilk A: Photoelastic analysis of bone deformation in the region of the mandibular condyle during mastication. *J Craniomaxillofac Surg* 30:160, 2002
44. Meyer C, Serhir L, Boutemi P: Experimental evaluation of three osteosynthesis device used for stabilizing condylar fractures of the mandible. *J Craniomaxillofac Surg* 34:173, 2006
45. van Eijden TM: Biomechanics of the mandible. *Crit Rev Oral Biol Med* 11:123, 2000

46. Pilling E, Eckelt U, Loukota R, Schneider K, Stadlinger B: Comparative evaluation of ten different condylar base fracture osteosynthesis techniques. *Br J Oral Maxillofac Surg* 48:527, 2010

47. Lauer G, Pradel W, Schneider M, Eckelt U: A new 3-dimensional plate for transoral endoscopic-assisted osteosynthesis of condylar neck fractures. *J Oral Maxillofac Surg* 65:964, 2007





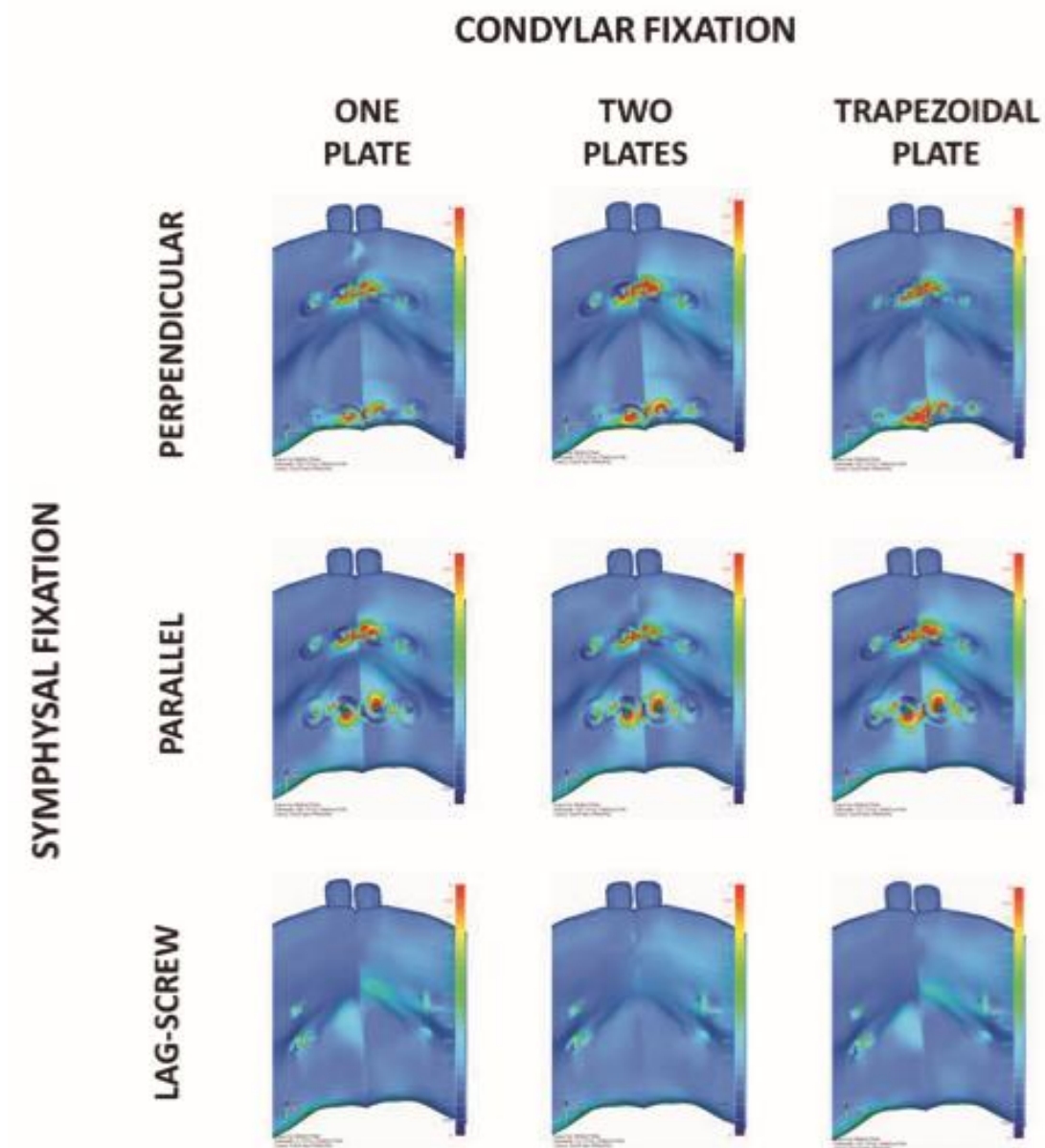


Figure 1: Tension distribution and displacement in symphyseal fractures

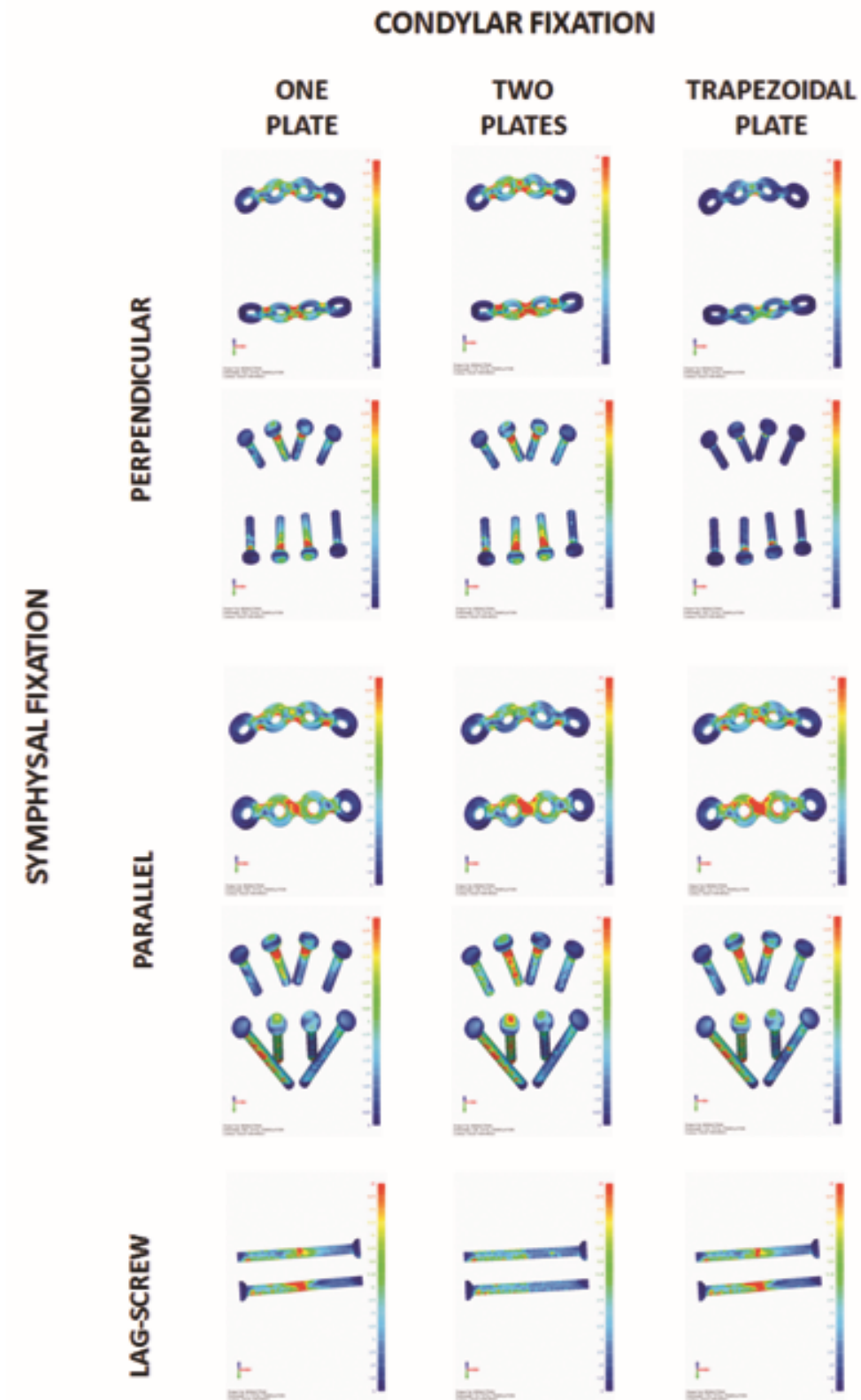


Figure 2: von Mises' analysis of stress distribution over the plates, screws and lag screw in the symphysis region

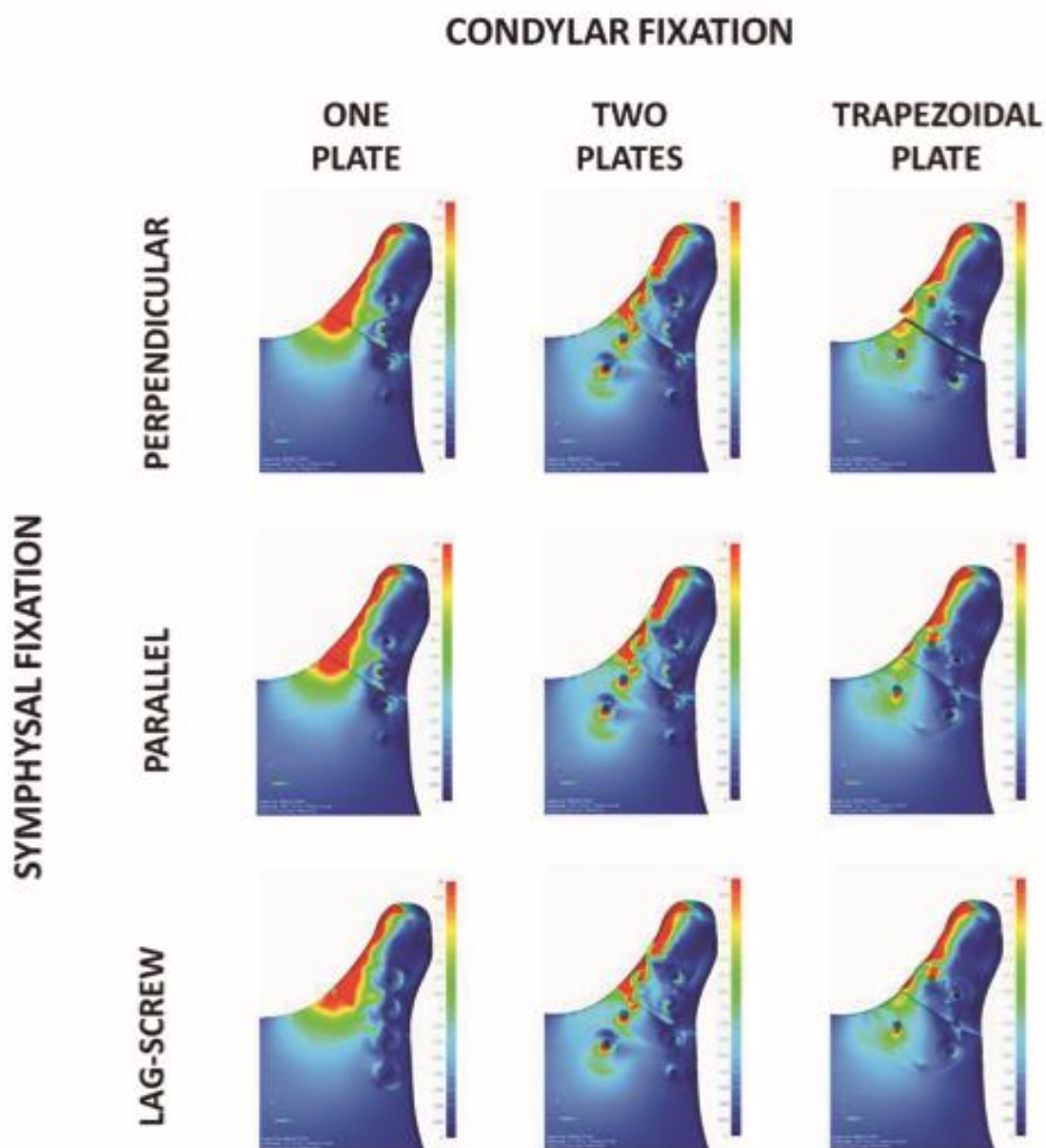


Figure 3: Tension distribution and displacement in condyle fractures

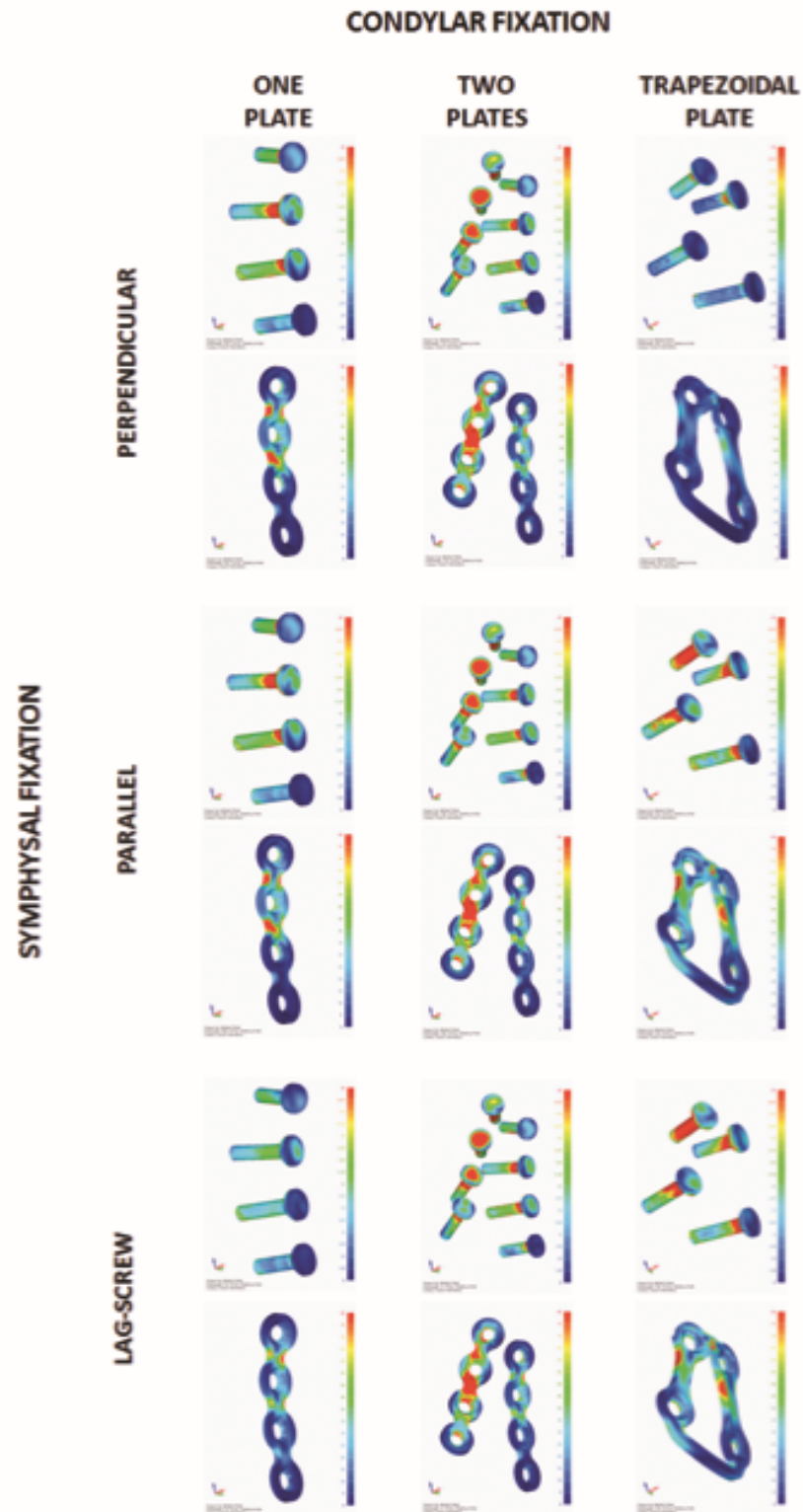


Figure 4: von Mises' analysis of the stress distribution over the plates and screws in the condyle region.





Supplemental File 1. Mandible model for FEM analysis.

#### 4. DISCUSSÃO GERAL

Uma vez que as fraturas da sínfise e côndilo mandibulares mostram-se fortemente associadas em estudos epidemiológicos, o estudo sobre a interação destas fraturas e suas fixações pode ser bastante útil para ajudar a definir quais combinações geram menor estresse e conseqüentemente melhor estabilidade para sua correta consolidação. Ainda que clinicamente a ocorrência concomitante destas fraturas seja evidente, a literatura apresenta somente estudos sobre métodos de fixação das fraturas isoladas. Neste estudo de elementos finitos foi possível observar a mudança no padrão de distribuição de forças quando a mandíbula é acometida por mais de uma linha de fratura e uma dependência do padrão de estabilização de cada uma destas.

A análise de elementos finitos pode ser considerada um método eficiente para avaliação do comportamento biomecânico da mandíbula. Embora o modelo matemático não permita inferências clínicas, esta pode oferecer uma descrição detalhada da distribuição e relação entre forças e tensões sem a variabilidade biológica<sup>11</sup>. No presente estudo, as linhas de fratura foram padronizadas, simplificando a complexidade das fraturas para que um desenho padronizado pudesse ser analisado. A fratura da região da sínfise mandibular, por exemplo, foi restrita a uma linha reta, na região central da mandíbula. Usualmente, fraturas desta região apresentam, em sua maioria, traços diagonais e mais próximos à região de parassínfise<sup>17</sup>. Para a região condilar apenas um traço na região do colo foi analisado. Outra padronização realizada foi a aplicação de força contra-lateral à fratura de côndilo. Uma análise prévia evidenciou que uma maior concentração de forças pode ser observada na região condilar quando a aplicação de carga é realizada na região de molar contralateral. Por isso, a análise foi realizada utilizando aplicação da carga dinâmica no molar inferior direito e a fratura com fixação foi realizada do lado esquerdo do modelo.

A carga utilizada neste estudo é compatível com a força de um adulto no pós-operatório recente, e o modelo simula o contato livre entre as interfaces da fratura. Entretanto, como trata-se de um estudo com modelo de progressão linear, se a simulação fosse carregada com o dobro do valor, todos os valores também teriam um aumento proporcional, sem mudanças no padrão de distribuição das tensões<sup>11</sup>.

Entretanto, é importante considerar ainda alguns pontos que podem ser considerados como restrições na análise pelo método dos elementos finitos. Tais limitações podem incluir a falta e dificuldade de detalhamento da estrutura dental, falta de detalhamento sobre as propriedades do osso medular, a incerteza de como distribuir realisticamente o carregamento muscular, e a dificuldade de modelar corretamente o contorno condilar. Como o objetivo é investigar a distribuição e variação das tensões em vez de prever a reação biológica, este modelo é adequado para os estudos<sup>25</sup>. Além disso, uma equipe especializada para a manipulação dos softwares é necessária para realização da análise. A criação de modelos virtuais, sua subdivisão em uma malha de elementos finitos e a aplicação da análise demanda conhecimento específico e pode demorar semanas para ser finalizada. Quanto mais elementos esta malha possui, mais precisos são os resultados e também mais tempo é requerido para o processamento da análise. Nesse sentido, mesmo com as limitações e características intrínsecas dessa análise, o presente estudo foi capaz de gerar algumas informações importantes para o estudo de fixações de fraturas associadas.

Em resumo, os resultados obtidos evidenciaram a correlação entre a distribuição de forças de acordo com o tipo de fixação utilizada. Os métodos de fixação que promoveram maior estabilidade da sínfise, as miniplacas paralelas e os parafusos na técnica Lag Screw, proporcionam um padrão de tensão na região condilar diferente daquele apresentado quando as miniplacas perpendiculares foram utilizadas. Desta forma, quando a região condilar é mais exigida, a fixação com a miniplaca trapezoidal mostrou-se insuficiente para conter a tensão, gerando um deslocamento na região da fratura. Assim, quando a sínfise é fixada pelas placas perpendiculares, a fratura da região condilar é mais adequadamente estabilizada com duas miniplacas retas.

Por sua vez, quando a sínfise foi fixada pelas miniplacas paralelas ou pela técnica Lag Screw, a fixação condilar pôde ser adequadamente estabilizada por duas placas ou pela placa trapezoidal. A fixação com apenas uma placa na região condilar gerou uma grande concentração de tensão na região anterior do côndilo, e, apesar de não ter apresentado deslocamento significativo, a área de tensão foi bastante extensa.

Nas imagens que mostram a região da sínfise é possível observar uma maior concentração de áreas vermelhas mais ao centro, nos grupos em que foram utilizadas



as placas, principalmente na região dos furos dos parafusos centrais. Os picos de tensão aconteceram na parte superior, que é a zona de tensão da sínfise<sup>26</sup>. Nos grupos em que foi utilizada a técnica Lag Screw os picos aconteceram na região medular e mais ao centro, em especial nos grupos em que o côndilo foi fixado com duas placas e placa trapezoidal. No grupo que associou o Lag-screw e apenas uma placa em côndilo, o pico aconteceu no ápice do parafuso superior, e com valor notoriamente mais inferior.

Nesta análise da sínfise é possível observar uma concentração de tensão, ou seja, uma maior área avermelhada, em osso na região inferior do grupo que associou as placas perpendiculares em sínfise e a placa trapezoidal em côndilo. Isso pode sugerir que a fixação não suportou as tensões, gerando, inclusive, um pequeno deslocamento da fratura. A análise de von Mises da mesma região mostra áreas predominantemente azuis, evidenciando pouca tensão. Ressalta-se que a intenção da fixação com mini-placas e/ou parafusos é a estabilidade das fraturas e a redução da tensão em osso e transferência de parte desta para os componentes de fixação, preservando a área de consolidação óssea<sup>26</sup>.

A análise da região condilar, por sua vez, mostra a predominância de zonas vermelhas na região mais anterior do côndilo. Quando o côndilo foi fixado com apenas uma placa, esta zona se estendeu mais inferiormente e atingiu o coto distal da fratura, próximo à chanfradura sigmoide. Nos demais grupos o pico de tensão aconteceu próximo ao furo do parafuso superior da placa mais anterior e do braço anterior da placa trapezoidal.

Entretanto, a imagem que mais se destaca é o deslocamento que aconteceu no grupo que associou as placas perpendiculares em sínfise com a placa trapezoidal em côndilo mais uma vez. A análise de von Mises mostra a placa trapezoidal e seus parafusos com áreas em tons de azul, evidenciando baixa tensão na fixação.

Assim, pode-se considerar que a fixação mais efetiva é aquela capaz de transmitir uma adequada transferência de tensão ao osso, evitando áreas extensas de tensão que podem extrapolar para o deslocamento, condição indesejada no pós-operatório. Os fragmentos que não são fixados corretamente podem gerar micro movimentos e consequente infecção e não união da fratura<sup>27</sup>.

Os dados obtidos neste estudo podem auxiliar em possíveis decisões clínicas, ainda que seja importante enfatizar que mais estudos sobre as associações das fixações destas fraturas sejam necessários. A ausência dos músculos da mastigação, e dos atritos nas interfaces osso-osso e osso-placa são algumas das limitações deste estudo que podem também interferir na análise de distribuição da tensão. Portanto, a necessidade de estudos biomecânicos e estudos clínicos randomizados são necessários para confirmar os resultados obtidos, especialmente por ser um estudo isolado que mostra a interação entre as fixações da sínfise e côndilo mandibulares.

## 5. CONCLUSÃO

Com base nos resultados e considerando as limitações deste estudo, pode-se concluir que a técnica Lag Screw e as placas dispostas paralelamente são suficientes para a fixação da sínfise mandibular, enquanto duas placas ou a placa trapezoidal são adequadas para a fixação da região condilar. Além disso, de acordo com a análise pelo método dos elementos finitos, a fixação da sínfise com as placas perpendiculares parece alterar a distribuição de forças e afetar, negativamente, a fixação do côndilo com a placa trapezoidal.

## Referências Bibliográficas

1. Qudah MA, Bataineh AB: A retrospective study of selected oral and maxillofacial fractures in a group of Jordanian children. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod. 2002 Sep;94:310.
2. Hogg NJ, Stewart TC, Armstrong JE, Girotti MJ: Epidemiology of maxillofacial injuries at trauma hospitals in Ontario, Canada, between 1992 and 1997. J Trauma. 2000 Sep;49:425.
3. Ellis E 3<sup>rd</sup>: Lag screw fixation of mandibular fractures. J Craniomaxillofac Trauma. 1997 Spring;3:16.
4. Gassner R, Tuli T, Hächl O, et al: Cranio-maxillofacial trauma: A 10 year review of 9,543 cases with 21,067 injuries. J Cranio-maxillofac Surg. 2003 Feb;31:51.
5. Stacey DH, Doyle JF, Mount DL, et al: Management of mandible fractures. Plast Reconstr Surg. 2006 Mar;117:48e.
6. Murthy AS, Lehman JA Jr. Symptomatic plate removal in maxillofacial trauma: a review of 76 cases. Ann Plast Surg. 2005 Dec;55:603-7.
7. Scolozzi P, Richter M. Treatment of severe mandibular fractures using AO reconstruction plates. J Oral Maxillofac Surg. 2003 Apr;61:458-61.
8. Motamedi MH. An assessment of maxillofacial fractures: a 5-year study of 237 patients. J Oral Maxillofac Surg. 2003 Jan;61(1):61-4.
9. Morris C, Bebeau NP, Brockhoff H, Tandon R, Twana P. Mandibular fractures: an analysis of the epidemiology and patterns of injury in 4,143 fractures. J Oral Maxillofac Surg. 2015 May;73(5):e951-12.

10. Haim D, Müller A, Leonhardt H, Nowak A, Richter G, Lauer G. Biomechanical study of the Delta plate and the TriLock Delta condyle trauma plate. *J Oral Maxillofac Surg*. 2011 Oct;69(10):2619-25.
11. de Jesus GP, Vaz LG, Gabrielli MF, Passeri LA, V Oliveira T, Noritomi PY, Jürgens P: Finite element evaluation of three methods of stable fixation of condyle base fractures. *Int J Oral Maxillofac Surg*. 2014 Oct;43:1251.
12. Choi KY, Yang JD, Chung HY, Cho BC. Current concepts in the mandibular condyle fracture management part I: overview of condylar fracture. *Arch Plast Surg*. 2012 Jul;39(4):291-300. doi: 10.5999/aps.2012.39.4.291. Epub 2012 Jul 13.
13. Costa FW, Bezerra MF, Ribeiro TR, Pouchain EC, Sabóia Vde P, Soares EC Biomechanical analysis of titanium plate systems in mandibular condyle fractures: a systematized literature review. *Acta Cir Bras*. 2012 Jun;27(6):424-9.
14. Choi BH, Yi CK, Yoo JH. Clinical evaluation of 3 types of plate osteosynthesis for fixation of condylar neck fractures. *J Oral Maxillofac Surg*. 2001 Jul;59(7):734-7.
15. Meyer C, Kahn JL, Boutemi P, Wilk A. Photoelastic analysis of bone deformation in the region of the mandibular condyle during mastication. *J Craniomaxillofac Surg*. 2002 Jun;30(3):160-9.
16. Asprino L, Consani S, de Moraes M: A comparative biomechanical evaluation of mandibular condyle fracture plating techniques. *J Oral Maxillofac Surg* 2006, Mar 64:452.
17. Munante-Cardenas JL, Facchina Nunes PH, Passeri LA: Etiology, treatment, and complications of mandibular fractures. *J Craniofac Surg*. 2015 May;26:611.
18. Madsen MJ, McDaniel CA, Haug RH. A biomechanical evaluation of plating techniques used for reconstructing mandibular symphysis/parasymphysis fractures. *J Oral Maxillofac Surg*. 2008 Oct;66(10):2012-9.

19. Vieira e Oliveira TR, Passeri LA: Mechanical evaluation of different techniques for symphysis fracture fixation--an in vitro polyurethane mandible study. *J Oral Maxillofac Surg* 2011 Jun; 69:e14.
20. Pilling E, Eckelt U, Loukota R, Schneider K, Stadlinger B. Comparative evaluation of ten different condylar base fracture osteosynthesis techniques. *Br J Oral Maxillofac Surg*. 2010 Oct;48(7):527-31. doi: 10.1016/j.bjoms.2009.09.010. Epub 2009 Oct 23.
21. Koriath TW, Versluis . Modeling the mechanical behavior of the jaws and their related structures by finite element (FE) analysis. *Crit Rev Oral Biol Med*. 1997;8(1):90-104.
22. Van Oosterwyck H, Duyck J, Vander Sloten J, Van der Perre G, De Cooman M, Lievens S, Puers R, Naert I. The influence of bone mechanical properties and implant fixation upon bone loading around oral implants. *Clin Oral Implants Res*. 1998 Dec;9(6):407-18.
23. Tanino F, Hayakawa I, Hirano S, Minakuchi S. Finite element analysis of stress-breaking attachments on maxillary implant-retained overdentures. *Int J Prosthodont*. 2007 Mar-Apr;20(2):193-8.
24. Tate GS, Ellis III E, Throckmorton G. Bite forces in patients treated for mandibular angle fractures: implications for fixation recommendations. *J Oral Maxillofac Surg*. 1994 Jul 52(7):734-6.
25. Ji B, Wang C, Liu L, Long J, Tian W, Wang H. A biomechanical analysis of titanium miniplates used for treatment of mandibular symphyseal fractures with the finite element method. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*. 2010 Mar;109(3):e21-7. doi: 10.1016/j.tripleo.2009.11.003.
26. Schilli W. Mandibular fractures, *in* Prein J (ed): *Manual of Internal Fixation in the Cranio-Facial Skeleton*, Berlin, Springer Verlag, 1998, p.57.

27. Goodday RH. Oral Maxillofac Surg Clin North Am. Management of fractures of the mandibular body and symphysis. 2013 Nov;25(4):601-16. doi: 10.1016/j.coms.2013.07.002. Epub 2013 Sep 7.

## ANEXO 1. NORMATIVA DA EDITORA PARA USO DO ARTIGO

Personal Use

24/01/2018 21:23



Q SEARCH CART MENU

## Personal use

Authors can use their articles, in full or in part, for a wide range of scholarly, non-commercial purposes as outlined below:

- Use by an author in the author's classroom teaching (including distribution of copies, paper or electronic)
- Distribution of copies (including through e-mail) to known research colleagues for their personal use (but not for Commercial Use)
- Inclusion in a thesis or dissertation (provided that this is not to be published commercially)
- Use in a subsequent compilation of the author's works
- Extending the Article to book-length form
- Preparation of other derivative works (but not for Commercial Use)
- Otherwise using or re-using portions or excerpts in other works

These rights apply for all Elsevier authors who publish their article as either a subscription article or an open access article. In all cases we require that all Elsevier authors always include a full acknowledgement and, if appropriate, a link to the final published version hosted on Science Direct.

Solutions



Solutions

Researchers



Researchers